

Title	基底核-脳幹-脊髄系神経回路網と身体筋骨格構造の力学的秩序形成による歩行運動生成
Sub Title	Generation of locomotion based on dynamic interaction among neuro-musculo-skeletal systems
Author	荻原, 直道(Ogihara, Naomichi) 土屋, 和雄(Tsuchiya, Kazuo) 中務, 真人(Nakatsukasa, Masato) 杉本, 靖博(Sugimoto, Yasuhiro) 青井, 伸也(Aoi, Shinya) 辻田, 勝吉(Tsujita, Katsuyoshi)
Publisher	
Publication year	2010
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2009. )
JaLC DOI	
Abstract	二ホンザルの二足歩行を対象として, 筋骨格構造の解剖学的数理モデルを構築し, 実歩行中に見られる適応現象の生体力学的分析を行った. また, 神経制御系の数理モデルを構築して身体筋骨格系・神経系・環境系の適切な相互作用により発現する歩行運動を動力学的に再現することを通して, 歩行の適応現象のメカニズムを構成論的に分析した. その結果, 筋骨格系に内在する構造制約や位相リセット機能など, 適応的二足歩行運動の獲得と生成に関する仕組みの一端を明らかにした.
Notes	研究種目: 特定領域研究  研究期間: 2005 ~ 2009  課題番号: 17075008  研究分野: バイオメカニクス, 知能機械工学  科研費の分科・細目:
Genre	Research Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_17075008seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_17075008seika</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：特定領域研究  
 研究期間：2005～2009  
 課題番号：17075008  
 研究課題名（和文） 基底核—脳幹—脊髄系神経回路網と身体筋骨格構造の力学的秩序形成による歩行運動生成  
 研究課題名（英文） Generation of locomotion based on dynamic interaction among neuro-musculo-skeletal systems  
 研究代表者  
 荻原 直道 (OGIHARA NAOMICHI)  
 慶應義塾大学・理工学部・専任講師  
 研究者番号：70324605

## 研究成果の概要（和文）：

ニホンザルの二足歩行を対象として、筋骨格構造の解剖学的数理モデルを構築し、実歩行中に見られる適応現象の生体力学的分析を行った。また、神経制御系の数理モデルを構築して身体筋骨格系・神経系・環境系の適切な相互作用により発現する歩行運動を動力学的に再現することを通して、歩行の適応現象のメカニズムを構成論的に分析した。その結果、筋骨格系に内在する構造制約や位相リセット機能など、適応的二足歩行運動の獲得と生成に関する仕組みの一端を明らかにした。

## 研究成果の概要（英文）：

We analytically and constructively investigated bipedal locomotion in the Japanese macaque by integrating physiological findings from the locomotor nervous system and the anatomy and biomechanics of the musculoskeletal system, with the aim of illuminating the dynamic principles underlying the emergence of adaptive locomotion in animals. As a result, some mechanisms underlying acquisition and generation of adaptive bipedal locomotion are clarified.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	20,300,000	0	20,300,000
2006 年度	19,500,000	0	19,500,000
2007 年度	18,500,000	0	18,500,000
2008 年度	19,200,000	0	19,200,000
2009 年度	14,100,000	0	14,100,000
総計	91,600,000	0	91,600,000

研究分野：バイオメカニクス，知能機械工学

科研費の分科・細目：

キーワード：移動知，解剖学，生体力学，歩行制御神経系，知能ロボティクス，ニホンザル，筋骨格モデル

## 1. 研究開始当初の背景

動物は、冗長で複雑な筋骨格構造を巧みに協調させ、多様な環境に適応的な歩行運動を

生成することができる。こうした動物の優れた歩行生成知能は、従来、生体神経回路網の精巧な制御機構に帰着されてきた。しかし動

物は、身体筋骨格構造に生得的に内在する自然な運動特性を合目的的に利用することによって、環境との適切な相互作用を可能とし、適応的かつ効率的な歩行運動を実現していることも明らかとなっている。すなわち、動物の適応的歩行生成原理の解明には、神経制御系単体の解析のみでは限界があり、その筋骨格構造や環境との動的相互作用の中で創発的に行われる情報処理のメカニズムを分析することが重要であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、ニホンザル(*Macaca fuscata*)の二足歩行を対象として、筋骨格構造の解剖学的数理モデルを構築し、実歩行中に見られる適応現象の生体力学的分析を進めると共に、神経制御系の数理モデルを構築して身体筋骨格系・神経系・環境系の適切な相互作用により発現する歩行運動を動力学的に再現することを通して、歩行の適応現象のメカニズムを構成論的に明らかにすることを目的とする。ニホンザルの二足歩行を対象としているのは、(1)ニホンザルが歩行神経生理学の実験動物として用いられているため、生理学的実験とシミュレーション実験の対比が可能となること、(2)ニホンザルの四足歩行から二足歩行への遷移が、二足歩行の起源を探る上で人類学的に興味深い研究対象となっているためである。

## 3. 研究の方法

### (1) ニホンザル精密筋骨格モデルの構築

ニホンザルの筋骨格系の形態や構造が規定する運動学的・生体力学的拘束を再現する、解剖学的に精密な筋骨格モデルを構築した。まず、ニホンザル新鮮屍体をX線CTを用いてスキャンし、ニホンザルの全身3次元体表面形状と骨形状を抽出した。取得した各骨の形態情報から主軸を計算し、部材座標系(骨座標系)を定義した。そして、各関節面形状を二次曲面で近似し、骨座標系に対する二次曲面の向きから関節面座標系を、この座標軸から関節の回転軸を、二次曲面頂点の曲率から回転中心を決定した。こうして求めた関節面の形状情報に基づき、隣接する骨を関節させることによって、関節運動の幾何学的拘束を表現した。モデルの自由度は計47である。

各節の剛体特性は、体表面データを各関節の回転中心で分割して算出した。筋系のパラメータは、ニホンザル新鮮屍体(オトナメス)の解剖を行い、その観察・計測結果に基づいてモデル化した。

### (2) 二足歩行運動のキネマティクス

トレッドミル上を二足歩行するニホンザル2個体の全身運動を、4台のハイスピードカメラを用いて同期撮影し、その歩行運動を

運動学的に分析した(図1)。得られた4方向の動画像フレーム毎に、片側8個の標識点の位置をデジタル化し、その3次元位置の時系列データを算出した。

二足歩行時の標識点の3次元運動データに、構築した解剖学的に精密なニホンザルの3次元全身筋骨格モデルをマッチングしてやれば、筋骨格系各要素の歩行中3次元動態を推定することが可能となる。具体的には、計測した標識点位置とモデル上の標識点位置の誤差、および各関節の可動域中心からの偏差を最小化するモデルの姿勢(関節角度)を計算した。標識点の位置情報は、モデルの自由度を規定するには不十分であるが、筋骨格系に内在する運動学的な拘束を利用することにより、解剖学的に無理のない自然な運動を推定することが可能となった。この推定結果から、歩行中の身体重心位置COMの時間変化、位置エネルギー、運動エネルギーを算出した。

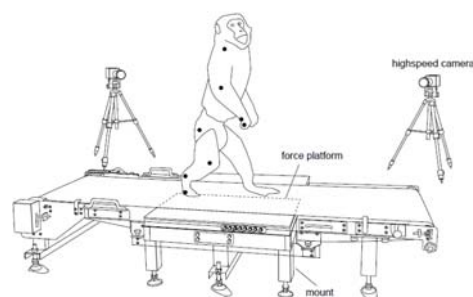


図1 ニホンザルの二足歩行運動計測。

### (3) 二足歩行運動の床反力

ヒト以外の霊長類の二足歩行時の垂直床反力のパターンは一峰性を示すが、ヒトの垂直床反力波形は特徴的な二峰性パターンを示す。このヒトに特異的な反力パターンによって、ヒトの二足歩行時の体重心の上下振動と歩行速度の変動(位置エネルギーと運動エネルギー)は逆相となり、エネルギー効率の良い歩行を達成していることが明らかとなっている。本研究では高度な二足歩行訓練を受けた猿まわしサルの床反力波形を、床反力計を用いて計測し、ヒトと同じような二峰性を示すか検証した。

### (4) 二足歩行シミュレーション

PD フィードバック制御則に基づくニホンザルの二足歩行運動の動力学的シミュレーションを行い、歩容の仮想的変化が移動効率に与える影響を検討した。

ここではニホンザルの筋骨格系を2次元7節の剛体リンクとしてモデル化し、片側8つの主要な筋を考慮した。各節や筋のパラメータは、前述の全身3次元筋骨格モデルに基づいて決定した。足部節は足根中足部と、質量ゼロの指部によりモデル化した。

運動の生成は以下の手順で行った。まず、

二足歩行の3次元運動データを矢状面に投影し、2次元平均歩容を求めた。そしてその歩容を再現する各筋の筋長変化を求め、2つの振動子とPD制御則に従って各筋への運動指令を算出した。この歩行生成手法を用いて、歩行周期や歩行のキネマティクスの改変が歩行の移動効率に与える影響を評価した。

#### (5)位相リセットの影響

歩行運動は、脊髄に存在するリズム生成神経回路網(CPG)が生成する各筋への交代性の運動指令によって比較的下位の神経系で自律的に生成され、その運動指令が感覚器からの情報や上位神経系からの入力に基づいて協調的に変化することで、外環境の変化や外乱に対して高い適応性を実現している。このような運動指令の調整には、多くの神経系が関与していると思われるが、感覚刺激に対してリズム運動指令の位相をシフトし、リズムをリセットする調整がなされていることが神経生理学的にも明らかとなっており、適応的な歩行運動の生成にこうした位相リセットが寄与していることが示唆されている。そこで我々はヒトの2次元筋骨格モデルを用いて、位相リセットが歩行の強靭性に与える影響を評価した。

ヒトの歩行中の下肢筋の筋電図を解析した結果から、歩行中の筋活動パターンは約5つの主成分(主波形)の組み合わせですべて表現されることが報告されている(図2)。本研究では、このような脊髄に内在する筋活動パターンが、CPGによって生成、組み合わせられて、歩行運動の基本的運動指令パターンを作っており、このフィードフォワード的な運動指令が姿勢制御などフィードバック系と協調的に動作することによって適応的で柔軟な歩行が実現されていると考え、新たな歩行生成神経系の制御モデルを構築し、歩行の生成を試み、位相リセットの影響を調べた。

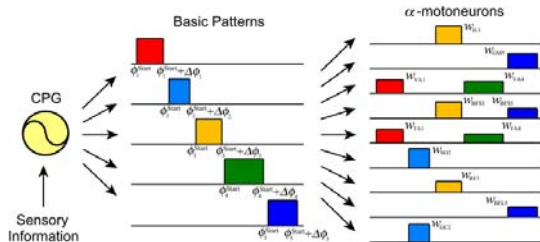


図2 CPGモデルの概念図。

### 4. 研究成果

#### (1) ニホンザル精密筋骨格モデルの構築

図3に構築した全身骨格モデルを示す。本研究では、ニホンザルの全身骨格を計20節から成る直鎖リンク系として表現し、片側約80の筋をモデル化した。筋骨格系の形態情報と、その動きを支配する物理学的法則を解剖学的に詳細に記述した本モデルは、ニホンザル

の二足歩行運動中の力学現象と情報処理のメカニズムを明らかにする上で重要なツールとして寄与する。

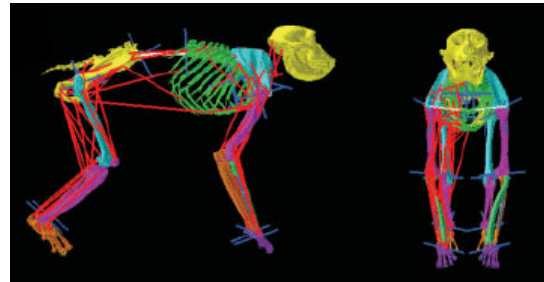


図3 解剖学的に精密なニホンザル全身筋骨格モデル。

#### (2) 二足歩行運動のキネマティクス

後肢各関節の3次元角度変化を分析した結果(図4)、猿まわしサルの二足歩行では、体幹や股関節でヒトと比較して相対的に大きな回旋運動が起こり、その歩行運動は本質的には3次元運動であることが明らかとなった。また歩行速度が大きくなるにつれて股関節が離地時により大きく伸展する一方、膝関節は立脚期中により大きく屈曲するなど、歩行速度の増大とともに適応的に歩容を変化させていることがわかった。さらに、ニホンザルの二足歩行では倒立振子メカニズムと呼ばれる位置エネルギーと運動エネルギーの相互変換による移動の効率化が図られているものの、その効果は歩行速度が比較的遅いときに限られ、接地率が0.5以上であっても弾性を利用して移動効率の向上を図る走行へ遷移している可能性が示唆された。

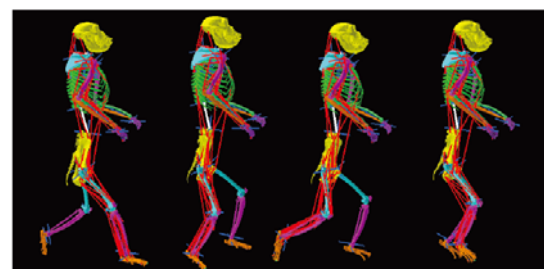


図4 モデルマッチング手法により再構成したニホンザルの二足歩行中の筋骨格系の動態。

#### (3) 二足歩行運動の床反力

猿まわしサルの二足歩行中の床反力を計測した結果(図5)、その床反力波形はピークが立脚期前半にみられる一峰性で、二峰性を示さないことが明らかとなった。しかし、普通のニホンザルの床反力波形ではそのピークが立脚期中期であるのに対して、猿まわしサルのそれは立脚期前期にシフトしていることが明らかとなった。床反力波形から積分

処理により重心の運動を計算した結果、重心の上下動振幅は普通のサルと比較して大きい、運動エネルギーの変動と完全な逆相にならない、すなわちヒトにみられる倒立振り子メカニズムによるエネルギー節約効果は、猿まわしサルの二足歩行においては限定的であることが示唆された。二足歩行中、腸腰筋や大腿筋膜張筋などの股関節伸展筋は、特に立脚期後期で股関節が伸展するときに大きく引き延ばされ、その可動域を制限する。こうした筋骨格系の構造的制約がニホンザルの二足歩行において効果的な蹴り出しを妨げている。ヒト的な二足歩行の進化には、股関節、特に屈筋群の構造的改変が重要であると示唆された。

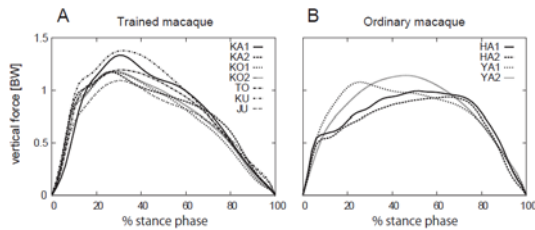


図 5 ニホンザル二足歩行中の垂直床反力波形。(A)猿まわしのサル、(B)普通のサル

#### (4) 二足歩行シミュレーション

PD 制御手法を用いて、歩行周期や歩行のキネマティクスの改変が歩行の移動効率に与える影響を評価した結果、ヒトの二足歩行では歩行速度と移動仕事率の関係はU字形になるが、ニホンザルの二足歩行では、歩行速度の上昇に伴い、移動仕事率(単位質量・単位移動距離当たりの消費エネルギー)が減少することがわかった(図6)。またニホンザルの二足歩行を仮想的にヒト的に変更すると、移動仕事率が低くなることが明らかとなった。これは、ヒトの歩行に見られる重心移動のパターンが歩行効率の向上に実際に寄与しているにもかかわらず、ニホンザルはこうした歩行を採用できていないことを示している。筋骨格系の構造的制約が、倒立振り子メカニズムの効果的活用を制約していることがシミュレーションの結果からも明らかとなった。

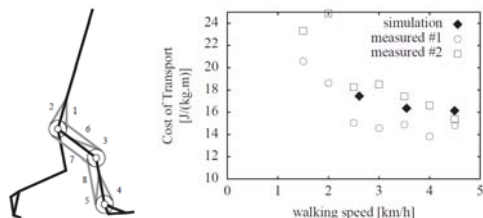


図 6 ニホンザル二足歩行の移動仕事率のシミュレーション結果と実測値の比較。左は計算に用いたニホンザルの二次元筋骨格モデルを示す。

#### (5) 位相リセットの影響

シミュレーションの結果、接地情報に基づく位相リセットは、歩行中の外乱に対する歩行の強靱性の向上に寄与していることが明らかとなった。また本モデルは、体幹節に作用する外力、体幹節質量の増加、床面の傾斜、といった歩行中の外乱や環境変動に対して、ある程度自律的に適応して歩行を持続できることも確認した。神経生理学的知見に基づいて、フィードフォワード信号と感覚情報に基づく運動指令の調整メカニズムを考慮することにより、ヒトの二足歩行運動の適応性をある程度再現することが可能となった。

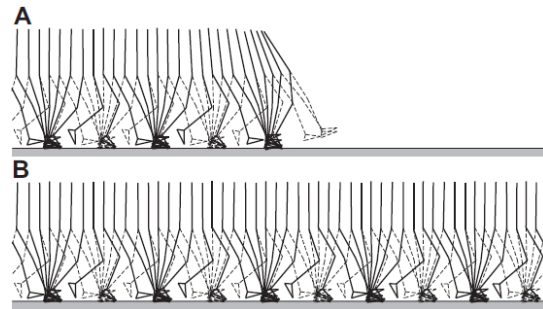


図 7 ヒトの二足歩行シミュレーションにおける位相リセットの寄与。(A)位相リセット無し。(B)有り。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

1. S. Aoi, N. Ogihara, T. Funato, Y. Sugimoto, K. Tsuchiya: Evaluating functional roles of phase resetting in generation of adaptive human bipedal walking with a physiologically-based model of the spinal pattern generator, *Biological Cybernetics*, Vol.102, pp.373-387, (2010) 査読有
2. Ogihara, N., Makishima, H., Nakatsukasa, M.: Three-dimensional musculoskeletal kinematics during bipedal locomotion in the Japanese macaque reconstructed based on an anatomical model-matching method, *Journal of Human Evolution*, Vol.58, pp.252-261, (2010) 査読有
3. Matsuura, Y., Ogihara, N., Nakatsukasa, M.: A method for quantifying articular surface morphology of metacarpals using quadric surface approximation, *International Journal of Primatology*, (2010) 査読有
4. Oishi, M., Ogihara, N., Endo, H.,

- Ichihara, N., Asari, M.: Dimensions of forelimb muscles in orangutans and chimpanzees, *Journal of Anatomy*, Vol.215, pp.373-382, (2009) 査読有
5. Kagaya, M., Ogihara, N., Nakatsukasa, M.: Rib orientation and implications for orthograde positional behavior in non-human anthropoids, *Primates*, Vol.50, pp.305-310, (2009) 査読有
  6. Sugimoto, Y., Aoi, S., Ogihara, N., Tsuchiya, K.: The Stabilizing function of musculoskeletal system for periodic motion, *Advanced Robotics*, Vol.23, pp.521-534, (2009) 査読有
  7. Ogihara, N., Makishima, H., Aoi, S., Sugimoto, Y., Tsuchiya, K., Nakatsukasa, M.: Development of an Anatomically Based Whole-Body Musculoskeletal Model of the Japanese Macaque (*Macaca fuscata*), *American Journal of Physical Anthropology*, Vol.139, pp.323-338, (2009) 査読有
  8. 土屋和雄: 動物運動の自律分散システムモデル, 計測と制御, Vol.48, pp. 677-680, (2009) 査読有
  9. 青井伸也, 荻原直道: 神経筋骨格モデルに基づくヒトの歩行シミュレーション, 計測と制御, Vol.48, pp.687-692, (2009) 査読有
  10. 青井伸也, 土屋和雄: 多脚歩行ロボットの力学特性と運動機能, システム/制御/情報, Vol53, pp.500-505, (2009) 査読有
  11. Aoi, S., Ogihara, N., Sugimoto, Y., Tsuchiya, K.: Simulating adaptive human bipedal locomotion based on phase resetting using foot-contact information. *Advanced Robotics*, Vol. 22, pp.1697-1713, (2008) 査読有
  12. 荻原直道: 初期人類の二足歩行運動の生体力学的復元: 現状と課題, *Anthropological Science (Japanese Series)*, Vol. 116(2), pp. 99-113, (2008) 査読無
  13. 荻原直道: 直立二足歩行の進化と筋骨格系の構造改変, *BRAIN MEDICAL*, Vol. 19, 381-386, (2007) 査読無
  14. Ogihara, N., Hirasaki, E., Kumakura, H., Nakatsukasa, M.: Ground reaction force profiles of bipedal walking in bipedally-trained Japanese monkeys, *Journal of Human Evolution*, Vol. 53, pp.302-308 (2007) 査読有
- [学会発表] (計 9 件)
1. N. Ogihara, S. Aoi, Y. Sugimoto, K. Tsuchiya, and M. Nakatsukasa: Computer simulation study of bipedal walking in the Japanese macaque based on a musculoskeletal model, 3rd International Symposium on Mobiligence, Awaji, Japan, (Nov 20, 2009)
  2. N. Ogihara, S. Aoi, Y. Sugimoto, T. Funato, H. Makishima, M. Nakatsukasa and K. Tsuchiya: System biomechanics of bipedal walking in the Japanese macaque: Exploration of principal mechanism for adaptive locomotion, 3rd International Symposium on Mobiligence, Awaji, Japan, (Nov 20, 2009)
  3. S. Aoi, N. Ogihara, T. Funato, Y. Sugimoto, and K. Tsuchiya: Generation of adaptive human bipedal locomotion based on a neuromusculoskeletal model, 3rd International Symposium on Mobiligence, Awaji, Japan, (Nov 20, 2009)
  4. Ogihara, N.: Biomechanical analyses and simulation of bipedal locomotion in the Japanese macaque, Workshop: "Adaptive motion in man, animals, and machines", Jena, Germany, (Feb 19, 2009)
  5. Ogihara, N., Aoi, S., Sugimoto, Y., Nakatsukasa, M., Tsuchiya, K.: Computer simulation of locomotion in the Japanese monkey: A constructive approach towards understanding adaptive mechanism in primate locomotion, IEEE/RSJ 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems Workshop, Nice, France (Sept 26, 2008)
  6. Ogihara, N., Hirasaki, E., Nakatsukasa, M.: Experimental and computational studies of bipedal locomotion in the bipedally-trained Japanese monkey, The International Primatological Society XXII Congress, Edinburgh, UK (Aug 7, 2008)
  7. Ogihara, N., Aoi, S., Sugimoto, Y., Nakatsukasa, M., Tsuchiya, K.: Synthetic study of quadrupedal /bipedal locomotion in the Japanese monkey, 4th International Symposium on Adaptive Motions of Animals and Machines, Cleveland, OH, USA (June 3, 2008)
  8. Sugimoto, Y., Aoi, S., Ogihara, N.,

Tsuchiya, K.: The role of the force-velocity relationship of muscle for the stability of periodic motions, 4th International Symposium on Adaptive Motions of Animals and Machines, Cleveland, OH, USA (June 3, 2008)

9. Aoi, S., Ogiwara, N., Sugimoto, Y., Tsuchiya, K.: Computer Simulation of Adaptive Human Bipedal Locomotion Based on Phase Resetting Using Foot Contact Information, 4th International Symposium on Adaptive Motions of Animals and Machines, Cleveland, OH, USA (June 3, 2008)

[図書] (計3件)

1. 荻原直道・青井伸也: 歩行運動のシステムシミュレーション, 土屋和雄・高草木薫・荻原直道編著: 身体適応-歩行運動の神経機構とシステムモデル (シリーズ移動知-第2巻), オーム社, 東京, pp.147-188, (2010)
2. Ogiwara, N., Hirasaki, E., Nakatsukasa, M.: Experimental and computational studies of bipedal locomotion in the bipedally-trained Japanese macaque, In: D'Aout, K. and Verecke, E.E. (eds) Studying Primate Locomotion: Linking Field and Laboratory Research, New York, Springer, (2010, in press)
3. Ogiwara, N., Yamazaki, N.: Computer simulation of bipedal locomotion: Toward elucidating correlations

among musculoskeletal morphology, energetics, and the origin of bipedalism, In: Ishida, H, Tuttle, R, Pickford, M, Ogiwara, N., Nakatsukasa, M (eds) Human Origins and Environmental Backgrounds, Springer, New York, pp. 167-174, (2006)

6. 研究組織

(1)研究代表者

荻原 直道 (OGIHARA NAOMICHI)  
慶應義塾大学・理工学部・専任講師  
研究者番号: 70324605

(2)研究分担者

土屋 和雄 (TSUCHIYA KAZUO)  
同志社大学・理工学部・教授  
研究者番号: 70227429  
中務 真人 (NAKATSUKASA MASATO)  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 00227828  
杉本 靖博 (SUGIMOTO YASUHIRO)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 70402972  
青井 伸也 (AOI SHINYA)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 60432366  
辻田 勝吉 (TSUJITA KATSUYOSHI)  
大阪工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 20252603

(3)連携研究者

該当なし